# 葛洲坝下中华鲟产卵场卵苗输移过程的数值模拟

王 悦[1,2],杨 宇[2,3],高 勇[4],韦章平[2],齐 亮[3,5]

(1. 南京大学生命科学院,江苏 南京 210009; 2. 南京水利科学研究院,江苏 南京 210029;
3. 水利工程和水科学国家重点实验室,江苏 南京 210098; 4. 中国长江三峡集团公司中华鲟研究所,湖北 宜昌 443100;
5. 河海大学水电学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**基于水动力学计算的基本原理,采用三维水动力模型及粒子跟踪技术,模拟了中华鲟(*Acipenser sinensis*)卵苗输移过程。将目前葛洲坝下中华鲟产卵场区域划分为9个子区域,将粒子赋予中华鲟卵粒特征,反演了中华鲟2009年自然繁殖卵苗沿河道输移路线和扩散过程。在划分的9个区域中,区域1、2、5为极有可能的产卵位置。模拟得到的产卵位置、卵输移路径及输移时间与实际监测情况基本一致。模拟结果显示,卵苗输移受天然河道地形和水流流场变化的影响较大。

**关键词:**中华鲟;产卵场;卵苗输移;粒子跟踪

**中图分类号:**Q612 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2012)01-0001-04

1981年葛洲坝水利枢纽修建后,中华鲟(*Acipenser sinensis*)产卵场主要集中在坝下至胭脂坝不足20 km的江段。在距离大坝约25 km的宜昌虎牙滩江段只发现过2次小规模的中华鲟产卵活动(常剑波,1999)。1995年后,根据对产卵亲鲟的超声波遥测定位及江底直接采捞中华鲟受精卵的结果,可以确定中华鲟产卵场位置基本固定在坝下约7 km长的江段(陶江平等,2009)。近几年,中华鲟的产卵场被进一步压缩在葛洲坝坝下至庙嘴之间约3 km的江段范围内(Lamouroux et al,1999)。继三峡工程修建以后,在中华鲟产卵期间的环境水力学问题上进行了更多的研究(常剑波,1999;杨宇,2007;王远坤等,2009),但这些研究主要围绕在中华鲟产卵所需流场问题,对于其鱼卵及仔鱼漂移涉及的水力学问题鲜有研究;另外,利用水流数值模拟方法结合鱼卵和仔鱼的漂移路径,对产卵场的位置进行推测也一直未见报道。本文通过对研究区域建立基于物质输移的水动力学模型对中华鲟卵苗输移路线进行数学模拟,以期提出一种适合用以推测鱼类产卵准确位置的水动力学方法。

在计算水力学领域,将水动力学方程进行离散,通过数值解法获得固定边界条件下的流场,已经成为获取一定范围流场的常规手段。在水体中存在可溶解的具有良好跟随性物质时,利用扩散和输移方程将之与水动力学方程进行耦合,也逐渐被环境水力学广泛应用。鱼卵作为一种可输移的、具有良好跟随性和一定独立性的粒子,是否符合现有的输移和扩散规律仍未经试验证实。本文通过建立一些假定,对鱼卵在水中的运动路径和方式进行数学模拟,利用已有的监测结果对鱼卵漂移的数值模拟方法进行初步探索。

## 1 流场数值模拟与鱼卵漂移的耦合

### 1.1 建模区域

研究区域为葛洲坝至夷陵大桥江段,此江段为中华鲟稳定的产卵场,中华鲟的上、下产卵区都在此河段。该区域东西方向宽度为1~2 km,南北方向长度约7 km,大部分水深小于30 m,最大水深约40 m。

### 1.2 基本假设与基本方程

1.2.1 基本假设 (1)模拟过程将中华鲟所产卵中未着床鱼卵和孵出幼苗作为漂流性粒子考虑;(2)水动力学方程符合静压假定;(3)粒子输移和扩散遵循朗之万方程(langevin equation);(4)假定在时间和空间上粒子释放过程是均匀的。

1.2.2 水动力方程 连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=S$$

$x$、$y$方向水平动量方程:

**收稿日期:**2011-09-05

**基金项目:**国家自然科学基金(NSFC50909064);水利部公益性专项(200801105);公益性科研院所基本科研经费(Y110003)。

**通讯作者:**杨宇,1976年,男,博士,高级工程师。E-mail: yyang@nhri.cn

**作者简介:**王悦,1986年,女,硕士在读,专业方向为水生动物学与分子生态学。E-mail:amethyst2000@126.com

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial u^2}{\partial x}+\frac{\partial vu}{\partial y}+\frac{\partial wu}{\partial z}=fv-g\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial x}-\frac{g}{\rho_0}\int_z^{\eta}\frac{\partial \rho}{\partial x}dz-\frac{1}{\rho_0 h}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right)+F_u+\frac{\partial}{\partial z}\left(v_t\frac{\partial u}{\partial z}\right)+u_sS$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial v^2}{\partial y}+\frac{\partial vu}{\partial x}+\frac{\partial wv}{\partial z}=-fv-g\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial y}-\frac{g}{\rho_0}\int_z^{\eta}\frac{\partial \rho}{\partial y}dz-\frac{1}{\rho_0 h}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right)+F_u+\frac{\partial}{\partial z}\left(v_t\frac{\partial v}{\partial z}\right)+v_sS$$

式中：$\eta$ 为水面高程；$d$ 为静水深；$h=\eta+d$ 为总水深；$u$、$v$、$w$ 是 $x$、$y$、$z$ 方向的速度分量；$f=2\Omega\sin\phi$ 是科氏力参数（$\Omega$ 地球自转角速度，$\phi$ 为地理纬度值）；$g$ 为重力加速度；$\rho$ 为水的速度；$s_{xx}$、$s_{xy}$、$s_{yx}$ 和 $s_{yy}$ 为应力张量的分量；$v_t$ 是垂直紊动粘性系数；$P_a$ 是大气压；$\rho_0$ 为水的相对密度；$S$ 为点源的泄流量；$u_s$、$v_s$ 为排入周围水体的速度。

水平压力项用梯度压力关系来描述，简化为以下形式：

$$F_u=\frac{\partial}{\partial x}\left(2A\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left[A\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]$$

$$F_v=\frac{\partial}{\partial y}\left(2A\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left[A\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]$$

式中：$A$ 为水平粘性系数。

1.2.3 粒子跟踪原理 粒子跟踪（particle tracking）采用拉格朗日离散方法，将模拟物质的质量分配到大量的粒子上，同时可以综合考虑粒子在水体中的运动过程，包括沉淀、上浮及河床冲刷等。粒子跟踪方法对实际问题进行了以下简化，一是忽略了不同粒子间可能的相互作用；二是粒子释放到水中后的运动速度与周围水体的速度一致。粒子的输移和扩散遵从朗之万方程，描述了粒子随时间改变的运动轨迹，其方程如下：

$$dX_t=a(t,X_t)dt+b(t,X_t)\xi_t dt$$

式中：$a$ 为漂移系数；$b$ 为扩散系数；$\xi$ 为随机数。

为了模拟通过给定时间的 $Y$ 值，假定初始值 $Y_0=X_0$，并且通过以下递归过程求解 $Y$ 值：

$$Y_{n+1}=Y_n+a(t,X_t)Y_n\Delta_n+b(t,X_t)Y_n\Delta W_n$$

式中：$a$、$b$ 含义同上，此处 $\Delta W=W_t-W_s\epsilon N(\mu=0,\sigma^2=\Delta_n)$ 是基于维纳过程（wiener process，又称布朗运动）的正态分布的高斯增量，是连续时间 $\tau_n\leqslant t\leqslant\tau_{n+1}$ 段内随机过程的增量。

## 1.3 粒子数量推算

已有成果表明（刘鉴毅等，2007），中华鲟自然繁殖期平均怀卵量为35.8万粒，密度约为1.05 g/cm$^3$，单粒卵径约为4 mm，并且鲟卵具有一定的粘性，利于其受精后着床孵化，本文仅对未着床卵及仔鱼输移进行研究。根据中国长江三峡集团公司中华鲟研究所2009年在175 m蓄水期中华鲟自然繁殖现场监测成果，推断得中华鲟产卵雌鲟数量为54.5尾，模拟时取数量为54尾。根据捕捞鲟卵的发育期，推断其产卵时间为11月23日午夜至24日凌晨；故本文以11月23日23：00～11月24日2：00为中华鲟产卵时段进行数值模拟，历程3 h。该时间段模型中以粒子的形式释放中华鲟卵，数值模拟中鲟卵的释放速度为自然繁殖产卵总量/产卵时间，即：

$$v_e=\sum_{i=1}^{n=54}m_i/T_{\text{total}}$$

式中：$m_i$ 为1尾中华鲟产卵量；$T_{\text{Total}}$ 为总产卵时间（3 h）。

单颗卵的体积为：$V_{卵}=\frac{4}{3}\pi R^3=0.0335\ \text{cm}^3$

单颗卵的质量为：$m_{卵}=1.05V_{卵}=0.0352$ g

单尾鱼平均产出卵的总质量为：

$m_i=358\ 000\times0.0352=12\ 590$ g

按质量计算每秒的释放量为：

$v_s\approx M\times54/(3600\times3)=63.0$ g/s

由上式可得模拟过程中粒子释放速度即中华鲟卵的释放速度为 $v_s\approx63.0$ g/s。

## 1.4 模拟范围分区

2009年中华鲟自然繁殖范围在葛洲坝大江电厂至隔流堤之间的区域，面积约为0.18 km$^2$。本研究基于以下假设对其分区计算：（1）预测区域的大致形状为矩形；（2）54尾中华鲟产卵主要集中在其中的某一小区域内；（3）54尾中华鲟产卵时在该小区域内均匀分布。基于以上假定，将2009年产卵场均分为9个，每个区域面积约为0.02 km$^2$，见图1。

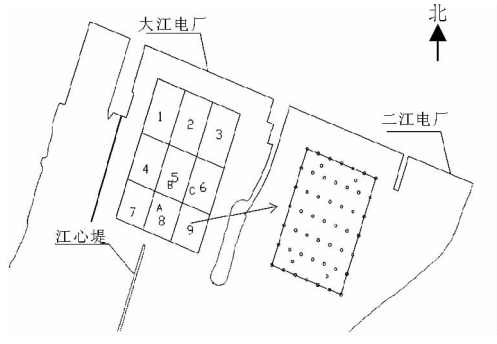


**图1 数模假定中华鲟产卵场分区及区域内鲟卵均匀分布示意**

**Fig. 1 Model hypothesis of area divided in sturgeon spawningsite and evenly-distributed eggs in the area**

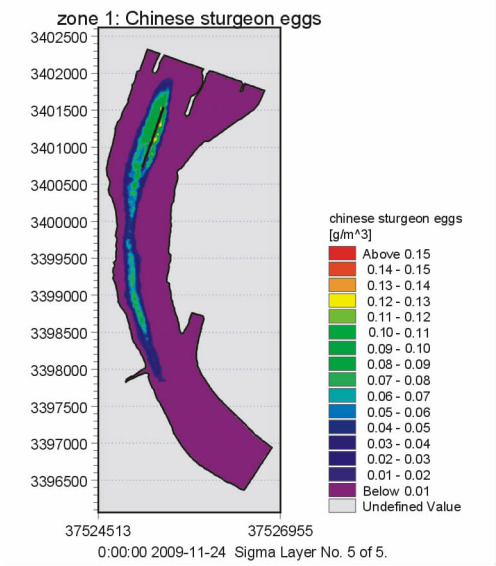


**图 2　区域 1 在 24 日 0：00 时刻的鲟卵路径**

**Fig. 2　Movement path of sturgeon eggs in area 1 at 0：00 on the 24th**

### 1.5　模拟结果及结论

利用数学模型在上述 9 个子区域释放中华鲟卵,分别模拟鲟卵的输移路径,图 2 为区域 1 模拟 24 日 0 时鲟卵路径瞬时图。当数值模拟获得的鲟卵输移路径最接近监测获得鲟卵位置时,所模拟子区域为最可能的产卵区域。

模拟水体底层子区域的中华鲟卵在整个模拟时段内的输移路径,共获得 9 组路径;其中,由子区域 1、2、5 释放的鲟卵经过了采样位置,因此子区域 1、2、5 为极有可能的产卵区域;子区域 3、4、6、8 释放的鲟卵部分经过采样位置,因此其为可能区域;其它位置 7、9 投放的鲟卵未经过采样位置,因此其为不可能区域。

## 2　展望

本文基于计算水动力学基本原理,采用三维水动力模型及粒子跟踪技术,将研究区域分为 9 个子区域,研究了 2009 年中华鲟自然繁殖期未着床卵的输移特性。得出中华鲟卵输移路径及输移时间在不同的假设产卵位置存在一定的差异。在划分的 9 个区域中,区域 1、2、5 为极有可能的产卵位置。本文初步探索了一种利用数值模拟水力学方法耦合粒子漂移运动估算鱼类产卵场的方法。综合现有研究成果,应在以下方面进一步开展研究。

(1)现场实测验证。本文提出的数值模型卵输移路径仅根据 2009 年样本分析得出,是否与真实产卵场位置相吻合尚需进一步实测验证。首先考虑根据前一年的中华鲟繁殖相关参数预测大致卵输移路径及产卵场位置,挑选对应区域输移路径上的特异点处设置卵苗采集样点,以当年的鲟卵粒子释放速度微调捕捞点,统计卵苗的获得时间及数量(有条件可辅助以水下摄影,具体描述卵苗由开始出现到完全通过的时间,建立正态分布曲线,取中值为卵苗通过实际时间),反演当年产卵场位置,再与图像采集结果比对,确立产卵场真实位置与预测的偏差。

(2)中华鲟自然繁殖行为学监控,发挥 DIDSON 设备可视化的特点,采取重点水域(预测产卵场位置及卵苗输移特异点)定点调查与其他水域巡航调查相结合的方式,对葛洲坝下中华鲟产卵场进行详细的科学调查,以区分中华鲟孵化场范围内同一水流流经区域(见图 1 的 1、4、7 位置)的产卵场实际具体分布;另外,还可以采用水下摄影的调查方法,对自然状况下产卵前或产卵时中华鲟的繁殖行为以及自然繁殖中华鲟鱼卵的发育状况进行跟踪拍摄,更加准确地估算中华鲟繁殖产卵时间。

(3)数值模拟模型的优化,初期的路径模拟并未考虑粒子本身的特征,如鱼卵的质量分布、粘黏度、沉浮性及扩散浓度梯度等,故在针对特定试验的精确度上可能不高;后续模型优化中,应考虑根据不同鱼卵的特征添加调节参数,使之在实际模拟中更具典型性,且能够有效地推广到其他鱼种的产卵场预测。

**参考文献**

常剑波. 1999. 长江中华鲟产卵群体结构和资源变动[D]. 武汉：中国科学院水生生物研究所.

刘鉴毅, 危起伟, 陈细华, 等. 2007. 葛洲坝下中华鲟繁殖生物学特性及其人工繁殖效果[J]. 应用生态学报,(6):1397－1402.

陶江平, 乔晔, 杨志, 等. 2009. 葛洲坝产卵场中华鲟繁殖群体数量与繁殖规模估算及其变动趋势分析[J]. 水生态学杂志,2(2):37－43.

王远坤, 夏自强, 王桂华, 等. 2009. 中华鲟产卵场平面平均涡量计算与分析[J]. 生态学报,29(1):538－544.

杨宇. 2007. 中华鲟葛洲坝栖息地水力特性研究[D]. 南京：河海大学.

Lamouroux N, Olivier J, Persat H, et al. 1999. Predicting community characteristics from habitat conditions: fluvial fish and hydraulics[J]. Freshwater Biology, 42(2):275－299.

(责任编辑　万月华)

# Numerical Simulation on Transport of Eggs and Fry of *Acipenser sinensis* in Spawning Site in Gezhouba Reach

WANG Yue[1,2], YANG Yu[2,3], GAO Yong[4], WEI Zhang-ping[2], QI Liang[3,5]

(1. Nanjing University of Life Sciences, Nanjing 210009, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering and Water Science, Nanjing 210098, China;
4. Institute of Chinese Sturgeon, China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, China;
5. Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract**: Based on the rudiment of hydrodynamics, three-dimensional hydrodynamic model and particle tracking technology performed, transport of eggs and fry of *Acipenser sinensis* in the spawning site in the reach of Gezhou Dam was simulated. The existing spawning site in the downstream area of Gezhou Dam was divided into 9 sub-areas, eggs of *A. sinensis* were featured as particles, and the transport and diffusion route of propagated *A. sinensis* fry in 2009 were simulated. Area 1, area 2 and area 5 of 9 sub-areas were spawning ones in all probability. The simulation of spawning area, route and time was similar to the results of site monitoring. The simulated result demonstrated that the transport of eggs and fry was affected by the landform of natural river courses and flow fields.

**Key words**: *Acipenser sinensis*; spawning site; transport of eggs and fry; particle tracking